

М.Ф. МИТРОХОВИЧ, А.П. ЛАШКО, Т.М. ЛАШКО, Л.П. СИДОРЕНКО

Інститут ядерних досліджень НАН України

(Просп. Науки, 47, Київ 03680; e-mail: anatolii.lashko@gmail.com)

УДК 539.163

ПРО СТРУКТУРУ РІВНЯ $K^\pi = 3/2^+$, 362 кеВ В ^{165}Ho

На магнітному β -спектрометрі типу $\pi\sqrt{2}$ з високою точністю виміряні відношення інтенсивностей електронів внутрішньої конверсії на К- та L-оболонках ^{165}Ho для γ -переходу з енергією 362 кеВ. Вперше визначені параметр проникнення λ для M2-компонента цього γ -переходу та параметр змішування $\delta(E3/M2)$. Величина домішки E3-мультипольності відповідає ймовірності радіаційного переходу $B(E3)(362 \text{ кеВ}) = (46 \pm 6) \text{ W.u.}$, що свідчить про її колективну природу і, можливо, про октупольну деформацію ядра ^{165}Ho .

Ключові слова: радіоактивність, ^{165}Dy , ^{165}Ho , магнітний спектрометр, внутрішня конверсія, параметр проникнення, параметр змішування за мультипольностями.

1. Вступ

Під час дослідження конверсійного спектра ^{165}Dy ($T_{1/2} = 2,34$ години), фрагмент схеми розпаду якого наведено на рис. 1, нами було встановлено, що γ -перехід з енергією 362 кеВ між протонними станами $K^\pi = 3/2^+ 3/2 [411]$ та $K^\pi = 7/2^- 7/2 [523]$ в ^{165}Ho має змішану (M2 + E3)-мультипольність [1]. Порівняно з теоретичними оцінками одночастинкової моделі Вайскопфа, M2-компонент цього переходу загальмований ($F_W(M2) \cong 12$), і для нього можливі аномалії в коефіцієнтах внутрішньої конверсії γ -променів, зумовлені ефектом проникнення. Ця обставина може суттєво вплинути на результати розрахунків величини параметра змішування $\delta(E3/M2)$ на основі конверсійних даних і потребує додаткового вивчення.

2. Методика експерименту

Джерела ^{165}Dy було отримано в реакції (n, γ) при опроміненні мішеней на реакторі ВВР-М потоком теплових нейтронів інтенсивністю $5 \cdot 10^{13}$ нейтронів $\cdot \text{см}^{-2}$. Мішені виготовлялись шляхом напилення в вакуумі збагаченого ^{164}Dy на алюмінієву

основу. Товщина напилення дорівнювала близько $10 \text{ мкг} \cdot \text{см}^{-2}$.

Спектри електронів внутрішньої конверсії (ЕВК) γ -переходу з енергією 362 кеВ були виміряні на магнітному β -спектрометрі типу $\pi\sqrt{2}$ з позиційно-чутливим детектором (ПЧД) [2]. З метою отримати більш точні дані про інтенсивності ліній електронів внутрішньої конверсії цього γ -переходу на К- та L-підоболонках ^{165}Ho , були проведені скрупульозні дослідження залежності ефективності реєстрації ПЧД з мікроканалних пластин, розміщеного у фокальній площині β -спектрометра, від місця детектування. Вона виявилася нелінійною і змінюється в межах 10–15% вздовж фокальної площини спектрометра.

На рис. 2 наведено ділянку конверсійного спектра ^{165}Dy в області розташування L-ліній γ -переходу з енергією 362 кеВ, скорегованого на ефективність реєстрації ПЧД. Висока роздільна здатність β -спектрометра (0,035% по $B\rho$) дає змогу визначати відносні інтенсивності конверсійних ліній з точністю до 1%.

3. Результати та їх обговорення

Обробку конверсійних спектрів проводили по розроблених нами програмах. Отримані значення ін-

© М.Ф. МИТРОХОВИЧ, А.П. ЛАШКО, Т.М. ЛАШКО, Л.П. СИДОРЕНКО, 2014

ISSN 2071-0194. Укр. фіз. журн. 2014. Т. 59, № 1

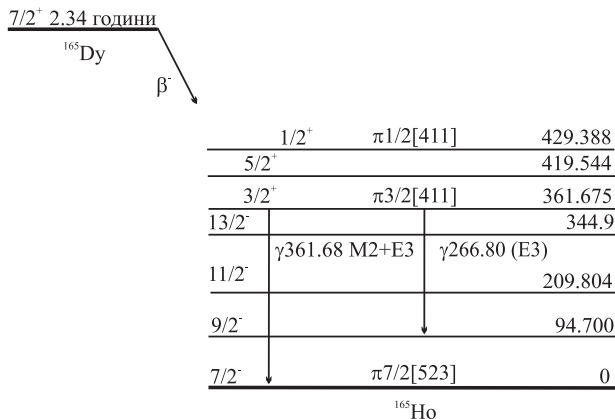


Рис. 1. Фрагмент схеми розпаду ¹⁶⁵Dy

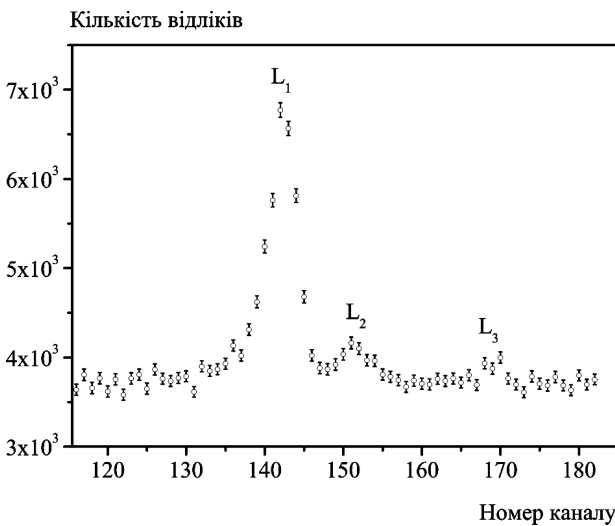


Рис. 2. Ділянка конверсійного спектра, яка містить лінії ЕВК γ -переходу з енергією 362 кеВ на L-підоболонках ¹⁶⁵Ho

Таблиця 1. Відносні інтенсивності ліній ЕВК γ -переходу з енергією 362 кеВ на К- та L-оболонках ¹⁶⁵Ho

Оболонка	I_e , відн. од.	Оболонка	I_e , відн. од.
K	643 ± 8	L ₂	$17,9 \pm 0,8$
L ₁	100	L ₃	$6,9 \pm 0,8$

тенсивностей ліній ЕВК для переходу γ 362 кеВ на К- та L-оболонках ¹⁶⁵Ho наведені в табл. 1.

Щодо результатів інших авторів, то на сьогоднішній день відомі три експериментальні роботи в цій області. Персоном зі співавторами [3] визначено коефіцієнт внутрішньої конверсії (КВК) γ -

переходу з енергією 362 кеВ на К-оболонці ¹⁶⁵Ho ($\alpha_K = 0,22 \pm 0,04$) та відношення інтенсивностей ліній ЕВК на К- і L-оболонках ¹⁶⁵Ho ($K/L = 4,8 \pm 1,2$). В роботах [4, 5] для цього переходу були поміряні відношення інтенсивностей ліній ЕВК ($K/L = 6,3 \pm 1,8$) та ($K/L_1 = 4,8 \pm 0,5$) відповідно. Наші виміри $K/L = 5,16 \pm 0,10$ дуже добре узгоджуються з даними робіт [3, 4], і мають значно кращу точність; відношення $K/L_1 = 6,43 \pm 0,08$ узгоджується з результатами роботи [5] в межах трьох середньоквадратичних похибок.

Нові, уточнені значення інтенсивностей ліній ЕВК, були проаналізовані з урахуванням ефекту внутрішньоядерної конверсії. Мова йде про аномалії в коефіцієнтах внутрішньої конверсії γ -променів, які зумовлені ефектом проникнення. Під ефектом проникнення або внутрішньоядерною конверсією в теорії внутрішньої конверсії розуміють поправку в КВК, яка виникає при заміні перехідних електромагнітних потенціалів, обчислених для точкового ядра (які виникають в момент переходу ядра з одного ядерного рівня на інший), на перехідні потенціали, обчислені для ядра певного розміру.

Ефект проникнення у випадку переходів магнітної мультипольності можна описати одним ядерним параметром λ [6]. Методика аналізу аномалій в КВК переходів змішаної мультипольності детально описана в роботі [7]. Параметр проникнення λ і параметр змішування δ знаходять за розв'язками системи рівнянь для абсолютних або відносних КВК. Для будь-якої i -підоболонки змішаного ($M2 + E3$)-переходу експериментальні КВК, з урахуванням ефекту проникнення в $M2$ -компоненті, мають вигляд [8]:

$$\alpha_{i, \text{exp}} = \frac{\alpha_i(M2)(1 + B_1^i \lambda + B_2^i \lambda^2) + \delta^2 \alpha_i(E3)}{1 + \delta^2}, \quad (1)$$

де B_1^i і B_2^i – параметри, які залежать тільки від хвильових функцій електрона і табульовані в [8]; $\alpha_i(M2)$ і $\alpha_i(E3)$ – теоретичні значення КВК на i -підоболонці для $M2$ - і $E3$ -переходів відповідно; $\alpha_{i, \text{exp}}$ – експериментальні значення КВК на i -підоболонці.

Аналогічний вираз можна записати і для відношень КВК.

Для пошуку аномалій в коефіцієнтах внутрішньої конверсії змішаних переходів дуже важливо

Таблиця 2. Енергії і структура основних та перших двох збуджених станів в ізотопах $^{159,161,163,165}\text{Ho}$

Ядро	K^π	Енергія, кеВ		Структура
		експеримент	теорія	
^{159}Ho	$7/2^-$	0	0	523↑ 97%
	$3/2^+$	–	250	411↑ 94%
	$1/2^+$	206	380	411↓ 88% 411↑ + Q ₁ (22) 9%
^{161}Ho	$7/2^-$	0	0	523↑ 97%
	$3/2^+$	299	260	411↑ 94% 411↓ + Q ₁ (22) 3%
	$1/2^+$	211	380	411↓ 88% 411↑ + Q ₁ (22) 9%
^{163}Ho	$7/2^-$	0	0	523↑ 98%
	$3/2^+$	360	240	411↑ 95% 411↓ + Q ₁ (22) 2%
	$1/2^+$	298	390	411↓ 91% 411↑ + Q ₁ (22) 8%
^{165}Ho	$7/2^-$	0	0	523↑ 99%
	$3/2^+$	362	160	411↑ 95%
	$1/2^+$	429	220	411↓ 95%

мати прецизійні дані не тільки про відносні, а і про абсолютні КВК на різних підоболонках атома. Саме тому, при аналізі разом з даними табл. 1 було використано значення α_K з роботи [3].

Аналогічно [9] система рівнянь для абсолютних та відносних КВК розв'язувалась шляхом мінімізації функціоналу за методом найменших квадратів:

$$\chi_{\min}^2 = \left(\frac{\alpha_{i,\text{exp}} - \alpha_i(\lambda, \delta)}{\Delta\alpha_{i,\text{exp}}} \right)^2 + \sum_{i,j} \left(\frac{(\alpha_i/\alpha_j)_{\text{exp}} - \alpha_i(\lambda, \delta)/\alpha_j(\lambda, \delta)}{\Delta(\alpha_i/\alpha_j)_{\text{exp}}} \right)^2, \quad (2)$$

де $\alpha_{i,\text{exp}}$, $\Delta\alpha_{i,\text{exp}}$, $(\alpha_i/\alpha_j)_{\text{exp}}$, $\Delta(\alpha_i/\alpha_j)_{\text{exp}}$ – експериментальні значення КВК і відношень КВК на i - та j -підоболонках зі своїми похибками; $\alpha_i(\lambda, \delta)$, $\alpha_j(\lambda, \delta)$ і $\alpha_i(\lambda, \delta)/\alpha_j(\lambda, \delta)$ – теоретичні значення КВК і відношень КВК на i - і j -підоболонках, які залежать від значень λ та δ , які є параметрами підгонки за методом χ_{\min}^2 .

Щоб уникнути локальних мінімумів, початкові значення λ і δ знаходили з розв'язків системи рівнянь графічним методом. Теоретичні значення КВК отримані за допомогою інтерполяції табличних значень з роботи [10], а електронних параметрів – з роботи [8].

Стандартні похибки визначаються за допомогою співвідношення:

$$\chi^2(\lambda_{\text{opt}} \pm \Delta\lambda) = \chi_{\min}^2 + 1, \quad (3)$$

де λ_{opt} – оптимальне значення параметра λ , яке мінімізує величину χ^2 . При цьому всі інші параметри фіксовані і відповідають своїм оптимальним значенням.

Аналогічно визначаються і похибки δ .

Були отримані такі результати: $-2,7 \leq \lambda_{\text{exp}} \leq 2,5$; $|\delta(E3/M2)| = 0,329 \pm 0,022$.

Експериментальне значення параметра проникнення не протирічить очікуваному $\lambda_{\text{th}} \cong 1$ для такого типу переходів [7].

Період напіврозпаду рівня $3/2^+$ 362 кеВ в ^{165}Ho відомий і згідно з даними компіляції [11] становить $T_{1/2}(362,675 \text{ кеВ}) = (1,512 \pm 0,004) \cdot 10^{-6} \text{ с}$. Визначена нами величина домішки $E3$ -мультипольності відповідає ймовірності радіаційного переходу $B(E3)(362 \text{ кеВ}) = (46 \pm 6) \text{ W.u.}$, що свідчить про її колективну природу і, можливо, про октупольну деформацію ядра ^{165}Ho .

Зазначимо також, що ймовірність радіаційного переходу $\gamma_{267 \text{ кеВ}}$ з рівня $3/2^+$ 362 кеВ на перший збуджений ротаційний рівень $9/2^-$ 95 кеВ основного стану ^{165}Ho , також становить кілька одностинкових одиниць $B(E3)(267 \text{ кеВ}) = (6,7 \pm \pm 2,1) \text{ W.u.}$ [11].

В.Г. Соловйовим та ін. [12, 13] було проведено розрахунки структури збуджених неротаційних станів ізотопів $^{159,161,163,165}\text{Ho}$ в рамках надтекучої моделі ядра з урахуванням взаємодії квазічастинки з вібраційними фононами. Результати розрахунків до енергії збудження 500 кеВ наведені в табл. 2. В п'ятому стовпчику таблиці наведений

отриманий з умови нормування хвильової функції внесок (у відсотках) найбільших компонентів хвильової функції. Наприклад, для стану ^{159}Ho з $K^\pi = 1/2^+$ через $411\downarrow 88\%$ позначено внесок одноквазічастинкового стану, а через $411\uparrow + + Q_1(22)$ 9% позначено внесок компонента: квазічастинка в стані $411\uparrow$ плюс фонон $Q_1(22)$.

Згідно з розрахунками [12, 13] перший неротаційний збуджений рівень в $^{159,161,163,165}\text{Ho}$ – одноквазічастинковий стан з характеристиками $K^\pi = 3/2^+ 3/2[411]$, а другий – з характеристиками $K^\pi = 1/2^+ 1/2[411]$. Така послідовність рівнів узгоджується з експериментальними даними лише для ^{165}Ho . Для ^{161}Ho та ^{163}Ho рівні розташовані навпаки, для ^{159}Ho рівень з $K^\pi = 3/2^+$ поки що не знайдено.

Структурні характеристики збуджених станів в ізотопах $^{159,161,163,165}\text{Ho}$ також виявилися схожими. Було показано, що збуджені стани цих ядер мають складну структуру і тільки найнижчі та невелика кількість станів з більш високою енергією збудження виявилися близькими до одноквазічастинкових.

Згідно з даними табл. 2 внесок одноквазічастинкового стану в структуру хвильової функції для рівнів з $K^\pi = 1/2^+$ та $K^\pi = 3/2^+$ не дуже відрізняється. Проте експериментальні дані свідчать, що це не так. В ^{159}Ho , ^{161}Ho та в ^{163}Ho ймовірність радіаційних $E3$ -переходів $\gamma 206$, $\gamma 211$ і $\gamma 298$ кеВ з рівня $1/2^+$ в основний стан становить лише $B(E3)(206 \text{ кеВ}) = 0,025 \pm 0,004$, $B(E3)(211 \text{ кеВ}) = 0,00281 \pm 0,00004$ та $B(E3)(298 \text{ кеВ}) = 0,00264 \pm 0,00008$ одначастинкових одиниць Вайскопфа відповідно [11]. Зовсім іншу картину маємо при розрядці рівня $3/2^+ 362 \text{ кеВ}$ в ^{165}Ho .

У роботах [12, 13] авторами зроблено висновок про те, що на енергію та структуру стану, який близький до одноквазічастинкового, суттєвий вплив може мати відхилення рівноважної деформації ядра в збудженому стані від рівноважної деформації ядра в основному стані. Можливо, саме з таким випадком ми й маємо справу в ^{165}Ho .

1. Н.Ф. Митрохович, Л.П. Сидоренко, А.И. Феоктистов, Изв. АН СССР. Сер. физ. **55**, 2154 (1991).
2. Н.Ф. Митрохович, Л.П. Сидоренко, в *Вопросы точности в ядерной спектроскопии 1990* (ИФ Литовской АН, Вильнюс, 1990), с. 21.
3. L. Persson, R. Hardell, and S. Nilsson, Arkiv Fysik **23**, 1 (1963).

4. В.А. Бондаренко, П.Т. Прокофьев, Л.И. Симонова, Изв. АН СССР. Сер. физ. **29**, 2168 (1965).
5. B.C. Dutta, T.V. Egidy, Th.W. Elze, and W. Kaiser, Z. Phys. **207**, 153 (1967).
6. И.М. Банд, М.А. Листенгартен, А.П. Фересин, *Аномалии в коэффициентах внутренней конверсии гамма-лучей* (Наука, Ленинград, 1976).
7. М.А. Листенгартен, в *Современные методы ядерной спектроскопии 1985* (Наука, Ленинград, 1986), с. 142.
8. R.S. Hager and E.C. Seltzer, Nucl. Data Tables A **6**, 1 (1969).
9. В.І. Киришук, А.П. Лашко, Т.М. Лашко, УФЖ **57**, 1097 (2012).
10. R.S. Hager and E.C. Seltzer, Nucl. Data Tables A **4**, 1 (1968).
11. A.K. Jain, A. Ghosh, and B. Singh, Nucl. Data Sheets **107**, 1075 (2006).
12. В.Г. Соловьев, П. Фогель, Г. Юнгклауссен, Изв. АН СССР. Сер. физ. **31**, 518 (1967).
13. В.Г. Соловьев, С.П. Федотов, Изв. АН СССР. Сер. физ. **36**, 706 (1972).

Одержано 25.02.13

Н.Ф. Митрохович,
А.П. Лашко, Т.Н. Лашко, Л.П. Сидоренко

О СТРУКТУРЕ УРОВНЯ $K^\pi = 3/2^+$, 362 кэВ В ^{165}Ho

Резюме

На магнитном β -спектрометре типа $\pi\sqrt{2}$ с высокой точностью измерены отношения интенсивностей электронов внутренней конверсии на K- и L-оболочках ^{165}Ho для γ -перехода с энергией 362 кэВ. Впервые определены параметр проникновения λ для M2-компонента этого γ -перехода и параметр смешивания $\delta(E3/M2)$. Величина примеси E3-мультипольности соответствует вероятности радиационного перехода $B(E3)(362 \text{ кэВ}) = (46 \pm 6) \text{ W.u.}$, что свидетельствует о ее коллективной природе и, возможно, об октупольной деформации ядра ^{165}Ho .

N.F. Mitrokhovich,
A.P. Lashko, T.N. Lashko, L.P. Sidorenko

ON THE STRUCTURE
OF $K^\pi = 3/2^+$ 362-keV LEVEL IN ^{165}Ho

Summary

High-precision measurements are carried out on a $\pi\sqrt{2}$ magnetic β -spectrometer for the relative intensities of the electron lines of internal conversion on the K- and L-shells of ^{165}Ho nucleus, with the 362-keV γ -transition being used. The penetration parameter λ for the M2-component of this transition and the multipole mixing ratio $\delta(E3/M2)$ are determined for the first time. The value of E3-multipolarity admixture corresponds to the probability of radiative transition $B(E3)(362 \text{ keV}) = (46 \pm 6) \text{ W.u.}$, which testifies to its collective nature and a probable octupole deformation of ^{165}Ho nucleus.